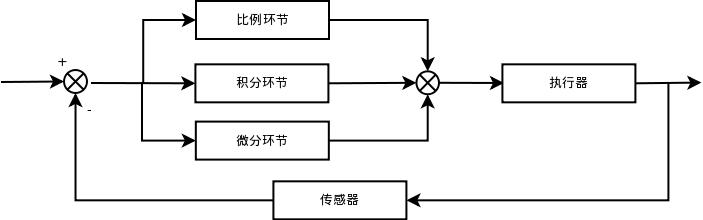
## PID控制算法的C语言实现一 PID算法原理

   最近两天在考虑一般控制算法的C语言实现问题，发现网络上尚没有一套完整的比较体系的讲解。于是总结了几天，整理一套思路分享给大家。

   在工业应用中PID及其衍生算法是应用最广泛的算法之一，是当之无愧的万能算法，如果能够熟练掌握PID算法的设计与实现过程，对于一般的研发人员来讲，应该是足够应对一般研发问题了，而难能可贵的是，在我所接触的控制算法当中，PID控制算法又是最简单，最能体现反馈思想的控制算法，可谓经典中的经典。经典的未必是复杂的，经典的东西常常是简单的，而且是最简单的，想想牛顿的力学三大定律吧，想想爱因斯坦的质能方程吧，何等的简单！简单的不是原始的，简单的也不是落后的，简单到了美的程度。先看看PID算法的一般形式：



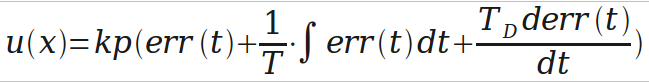
   PID的流程简单到了不能再简单的程度，通过误差信号控制被控量，而控制器本身就是比例、积分、微分三个环节的加和。这里我们规定（在t时刻）：

   1.输入量为rin(t);

   2.输出量为rout(t);

   3.偏差量为err(t)=rin(t)-rout(t);

   pid的控制规律为



   理解一下这个公式，主要从下面几个问题着手，为了便于理解，把控制环境具体一下：

   1.规定这个流程是用来为直流电机调速的;

   2.输入量rin(t)为电机转速预定值;

   3.输出量rout(t)为电机转速实际值;

   4.执行器为直流电机;

   5.传感器为光电码盘，假设码盘为10线;

   6.直流电机采用PWM调速 转速用单位 **转/min** 表示;

  不难看出以下结论：

   1.输入量rin（t）为电机转速预定值（转/min）;

   2. 输出量rout(t)为电机转速实际值（转/min）;

   3.偏差量为预定值和实际值之差（转/min）;

   那么以下几个问题需要弄清楚：

   1.通过PID环节之后的U(t)是什么值呢？

   2.控制执行器（直流电机）转动转速应该为电压值（也就是PWM占空比）。

   3.那么U(t)与PWM之间存在怎样的联系呢？

<http://blog.21ic.com/user1/3407/archives/2006/33541.html>（见附录1）这篇文章上给出了一种方法，即，每个电压对应一个转速，电压和转速之间呈现线性关系。但是我考虑这种方法的前提是把直流电机的特性理解为线性了，而实际情况下，直流电机的特性绝对不是线性的，或者说在局部上是趋于线性的，这就是为什么说PID调速有个范围的问题。具体看一下http://articles.e-works.net.cn/component/article90249.htm（见附录2）这篇文章就可以了解了。所以在正式进行调速设计之前，需要现有开环系统，测试电机和转速之间的特性曲线（或者查阅电机的资料说明），然后再进行闭环参数整定。这篇先写到这，下一篇说明连续系统的离散化问题。并根据离散化后的特点讲述位置型PID和增量型PID的用法和C语言实现过程。

## PID控制算法的C语言实现二 PID算法的离散化

   上一节中，我论述了PID算法的基本形式，并对其控制过程的实现有了一个简要的说明，通过上一节的总结，基本已经可以明白PID控制的过程。这一节中先继续上一节内容补充说明一下。

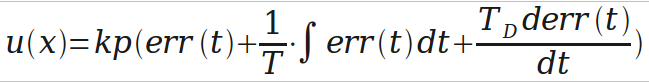
   1.说明一下反馈控制的原理，通过上一节的框图不难看出，PID控制其实是对偏差的控制过程;

   2.如果偏差为0,则比例环节不起作用，只有存在偏差时，比例环节才起作用。

   3.积分环节主要是用来消除静差，所谓静差，就是系统稳定后输出值和设定值之间的差值，积分环节实际上就是偏差累计的过程，把累计的误差加到原有系统上以抵消系统造成的静差。

   4.而微分信号则反应了偏差信号的变化规律，或者说是变化趋势，根据偏差信号的变化趋势来进行超前调节，从而增加了系统的快速性。

   好了，关于PID的基本说明就补充到这里，下面将对PID连续系统离散化，从而方便在处理器上实现。下面把连续状态的公式再贴一下：



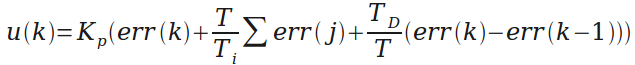
   假设采样间隔为T，则在第K T时刻：

偏差err(K)=rin(K)-rout(K);

积分环节用加和的形式表示，即err(K)+err(K+1)+……;

微分环节用斜率的形式表示，即[err(K)-err(K-1)]/T;

从而形成如下PID离散表示形式：



则u(K)可表示成为：

ad8e315543b5016a3a2935b0

至于说Kp、Ki、Kd三个参数的具体表达式，我想可以轻松的推出了，这里节省时间，不再详细表示了。

其实到这里为止，PID的基本离散表示形式已经出来了。目前的这种表述形式属于位置型PID，另外一种表述方式为增量式PID，由U上述表达式可以轻易得到：

affcef67f075f851ab184cbf

那么：

8750b2b225b1b3d2d8335a69

这就是离散化PID的增量式表示方式，由公式可以看出，增量式的表达结果和最近三次的偏差有关，这样就大大提高了系统的稳定性。需要注意的是最终的输出结果应该为

       u(K)+增量调节值;

PID的离散化过程基本思路就是这样，下面是将离散化的公式转换成为C语言，从而实现微控制器的控制作用。

## PID控制算法的C语言实现三 位置型PID的C语言实现

   上一节中已经抽象出了位置性PID和增量型PID的数学表达式，这一节，重点讲解C语言代码的实现过程，算法的C语言实现过程具有一般性，通过PID算法的C语言实现，可以以此类推，设计其它算法的C语言实现。

   第一步：定义PID变量结构体，代码如下：

struct \_pid{  
    float SetSpeed;            //定义设定值  
    float ActualSpeed;        //定义实际值  
    float err;                //定义偏差值  
    float err\_last;            //定义上一个偏差值  
    float Kp,Ki,Kd;            //定义比例、积分、微分系数  
    float voltage;          //定义电压值（控制执行器的变量）  
    float integral;            //定义积分值  
}pid;

控制算法中所需要用到的参数在一个结构体中统一定义，方便后面的使用。

  第二部：初始化变量，代码如下：

void PID\_init(){  
    printf("PID\_init begin \n");  
    pid.SetSpeed=0.0;  
    pid.ActualSpeed=0.0;  
    pid.err=0.0;  
    pid.err\_last=0.0;  
    pid.voltage=0.0;  
    pid.integral=0.0;  
    pid.Kp=0.2;  
    pid.Ki=0.015;  
    pid.Kd=0.2;  
    printf("PID\_init end \n");  
}

统一初始化变量，尤其是Kp,Ki,Kd三个参数，调试过程当中，对于要求的控制效果，可以通过调节这三个量直接进行调节。

第三步：编写控制算法，代码如下：

float PID\_realize(float speed){  
    pid.SetSpeed=speed;  
    pid.err=pid.SetSpeed-pid.ActualSpeed;  
    pid.integral+=pid.err;  
    pid.voltage=pid.Kp\*pid.err+pid.Ki\*pid.integral+pid.Kd\*(pid.err-pid.err\_last);  
    pid.err\_last=pid.err;  
    pid.ActualSpeed=pid.voltage\*1.0;  
    return pid.ActualSpeed;  
}

注意：这里用了最基本的算法实现形式，没有考虑死区问题，没有设定上下限，只是对公式的一种直接的实现，后面的介绍当中还会逐渐的对此改进。

   到此为止，PID的基本实现部分就初步完成了。下面是测试代码：

int main(){  
    printf("System begin \n");  
    PID\_init();  
    int count=0;  
    while(count<1000)  
    {  
        float speed=PID\_realize(200.0);  
        printf("%f\n",speed);  
        count++;  
    }  
return 0;  
}

下面是经过1000次的调节后输出的1000个数据（具体的参数整定过程就不说明了，网上这种说明非常多）：

83.000001  
11.555000  
59.559675  
28.175408  
52.907421  
38.944152  
51.891699  
46.141651  
53.339054  
51.509998  
55.908450  
55.944631  
58.970680  
59.882936  
62.225001  
63.537254  
65.527707  
67.011058  
68.810646  
70.355318  
72.042040  
73.595658  
75.207620  
76.745444  
78.301526  
79.812136  
81.321929  
82.800304  
84.268909  
85.713108  
87.143455  
88.553005  
89.946960  
91.322078  
92.680996  
94.022234  
95.347186  
96.655242  
97.947180  
99.222808  
100.482601  
101.726572  
102.955049  
104.168125  
105.366066  
106.549019  
107.717187  
108.870756  
110.009898  
111.134811  
112.245652  
113.342615  
114.425860  
115.495564  
116.551897  
117.595029  
118.625116  
119.642331  
120.646826  
121.638767  
122.618307  
123.585603  
124.540813  
125.484079  
126.415549  
127.335383  
128.243715  
129.140691  
130.026459  
130.901149  
131.764909  
132.617870  
133.460162  
134.291942  
135.113308  
135.924419  
136.725382  
137.516332  
138.297401  
139.068697  
139.830352  
140.582499  
141.325237  
142.058701  
142.782985  
143.498218  
144.204509  
144.901969  
145.590726  
146.270843  
146.942486  
147.605718  
148.260674  
148.907425  
149.546109  
150.176794  
150.799612  
151.414626  
152.021959  
152.621696  
153.213951  
153.798781  
154.376315  
154.946626  
155.509812  
156.065958  
156.615146  
157.157471  
157.693012  
158.221871  
158.744097  
159.259826  
159.769078  
160.271991  
160.768588  
161.258996  
161.743264  
162.221494  
162.693737  
163.160075  
163.620593  
164.075347  
164.524422  
164.967877  
165.405795  
165.838235  
166.265257  
166.686967  
167.103377  
167.514610  
167.920681  
168.321682  
168.717670  
169.108719  
169.494862  
169.876198  
170.252740  
170.624605  
170.991799  
171.354406  
171.712487  
172.066080  
172.415265  
172.760077  
173.100594  
173.436838  
173.768895  
174.096796  
174.420594  
174.740352  
175.056096  
175.367915  
175.675818  
175.979886  
176.280136  
176.576656  
176.869444  
177.158600  
177.444121  
177.726087  
178.004510  
178.279458  
178.550967  
178.819094  
179.083860  
179.345315  
179.603504  
179.858466  
180.110241  
180.358866  
180.604388  
180.846849  
181.086262  
181.322699  
181.556172  
181.786733  
182.014396  
182.239222  
182.461226  
182.680475  
182.896971  
183.110768  
183.321881  
183.530369  
183.736239  
183.939545  
184.140301  
184.338555  
184.534321  
184.727651  
184.918558  
185.107080  
185.293243  
185.477080  
185.658625  
185.837886  
186.014930  
186.189745  
186.362382  
186.532859  
186.701207  
186.867437  
187.031605  
187.193713  
187.353802  
187.511884  
187.667997  
187.822151  
187.974384  
188.124700  
188.273148  
188.419728  
188.564488  
188.707429  
188.848592  
188.987995  
189.125644  
189.261576  
189.395801  
189.528364  
189.659258  
189.788528  
189.916170  
190.042233  
190.166702  
190.289633  
190.411007  
190.530867  
190.649236  
190.766119  
190.881544  
190.995531  
191.108087  
191.219243  
191.329005  
191.437382  
191.544428  
191.650111  
191.754504  
191.857565  
191.959350  
192.059857  
192.159119  
192.257135  
192.353919  
192.449511  
192.543890  
192.637105  
192.729137  
192.820032  
192.909776  
192.998410  
193.085920  
193.172360  
193.257700  
193.341993  
193.425214  
193.507408  
193.588568  
193.668715  
193.747847  
193.826004  
193.903175  
193.979391  
194.054643  
194.128963  
194.202349  
194.274828  
194.346393  
194.417073  
194.486854  
194.555777  
194.623820  
194.691027  
194.757390  
194.822919  
194.887626  
194.951536  
195.014633  
195.076965  
195.138496  
195.199273  
195.259270  
195.318547  
195.377060  
195.434856  
195.491918  
195.548283  
195.603919  
195.658886  
195.713145  
195.766734  
195.819654  
195.871912  
195.923517  
195.974472  
196.024791  
196.074478  
196.123558  
196.172016  
196.219859  
196.267115  
196.313778  
196.359851  
196.405363  
196.450296  
196.494672  
196.538492  
196.581753  
196.624494  
196.666678  
196.708363  
196.749493  
196.790138  
196.830267  
196.869889  
196.909019  
196.947656  
196.985803  
197.023493  
197.060701  
197.097449  
197.133733  
197.169558  
197.204940  
197.239872  
197.274378  
197.308436  
197.342089  
197.375309  
197.408125  
197.440523  
197.472520  
197.504114  
197.535309  
197.566127  
197.596546  
197.626594  
197.656258  
197.685546  
197.714486  
197.743047  
197.771265  
197.799113  
197.826629  
197.853799  
197.880631  
197.907131  
197.933284  
197.959122  
197.984629  
198.009823  
198.034705  
198.059275  
198.083520  
198.107481  
198.131129  
198.154493  
198.177566  
198.200349  
198.222843  
198.245062  
198.267001  
198.288662  
198.310059  
198.331178  
198.352049  
198.372645  
198.392982  
198.413066  
198.432911  
198.452499  
198.471846  
198.490953  
198.509819  
198.528439  
198.546842  
198.565003  
198.582945  
198.600648  
198.618147  
198.635415  
198.652474  
198.669313  
198.685955  
198.702378  
198.718611  
198.734625  
198.750448  
198.766067  
198.781497  
198.796736  
198.811776  
198.826628  
198.841303  
198.855788  
198.870087  
198.884218  
198.898162  
198.911943  
198.925538  
198.938970  
198.952229  
198.965320  
198.978257  
198.991033  
199.003643  
199.016092  
199.028390  
199.040542  
199.052536  
199.064373  
199.076067  
199.087617  
199.099019  
199.110280  
199.121407  
199.132381  
199.143240  
199.153940  
199.164511  
199.174957  
199.185270  
199.195457  
199.205514  
199.215440  
199.225262  
199.234930  
199.244503  
199.253928  
199.263275  
199.272468  
199.281571  
199.290541  
199.299421  
199.308165  
199.316815  
199.325345  
199.333789  
199.342115  
199.350336  
199.358462  
199.366479  
199.374396  
199.382228  
199.389943  
199.397586  
199.405110  
199.412555  
199.419891  
199.427152  
199.434307  
199.441389  
199.448363  
199.455264  
199.462073  
199.468802  
199.475442  
199.481995  
199.488475  
199.494857  
199.501183  
199.507404  
199.513578  
199.519639  
199.525656  
199.531579  
199.537437  
199.543230  
199.548936  
199.554583  
199.560149  
199.565647  
199.571073  
199.576436  
199.581730  
199.586961  
199.592118  
199.597220  
199.602260  
199.607218  
199.612132  
199.616974  
199.621764  
199.626486  
199.631156  
199.635757  
199.640316  
199.644808  
199.649249  
199.653636  
199.657959  
199.662246  
199.666457  
199.670635  
199.674752  
199.678815  
199.682833  
199.686798  
199.690715  
199.694583  
199.698409  
199.702177  
199.705905  
199.709582  
199.713209  
199.716788  
199.720339  
199.723826  
199.727276  
199.730690  
199.734054  
199.737378  
199.740657  
199.743901  
199.747111  
199.750260  
199.753393  
199.756474  
199.759526  
199.762524  
199.765490  
199.768422  
199.771314  
199.774169  
199.776992  
199.779775  
199.782527  
199.785247  
199.787938  
199.790590  
199.793204  
199.795787  
199.798338  
199.800860  
199.803343  
199.805802  
199.808225  
199.810624  
199.812986  
199.815326  
199.817642  
199.819915  
199.822175  
199.824388  
199.826587  
199.828755  
199.830902  
199.833006  
199.835097  
199.837155  
199.839194  
199.841210  
199.843191  
199.845168  
199.847096  
199.849024  
199.850905  
199.852784  
199.854621  
199.856449  
199.858238  
199.860016  
199.861757  
199.863486  
199.865199  
199.866879  
199.868549  
199.870186  
199.871813  
199.873419  
199.874997  
199.876563  
199.878109  
199.879620  
199.881136  
199.882613  
199.884088  
199.885527  
199.886971  
199.888371  
199.889783  
199.891142  
199.892518  
199.893845  
199.895180  
199.896485  
199.897783  
199.899057  
199.900322  
199.901562  
199.902797  
199.904010  
199.905222  
199.906392  
199.907576  
199.908720  
199.909875  
199.910985  
199.912108  
199.913193  
199.914287  
199.915352  
199.916423  
199.917459  
199.918505  
199.919527  
199.920526  
199.921513  
199.922496  
199.923452  
199.924415  
199.925348  
199.926275  
199.927198  
199.928108  
199.929019  
199.929903  
199.930788  
199.931653  
199.932509  
199.933353  
199.934187  
199.935002  
199.935816  
199.936617  
199.937420  
199.938195  
199.938971  
199.939733  
199.940477  
199.941228  
199.941961  
199.942685  
199.943392  
199.944111  
199.944804  
199.945491  
199.946181  
199.946854  
199.947518  
199.948165  
199.948824  
199.949456  
199.950083  
199.950714  
199.951326  
199.951930  
199.952532  
199.953125  
199.953714  
199.954290  
199.954863  
199.955424  
199.955979  
199.956538  
199.957073  
199.957623  
199.958146  
199.958671  
199.959189  
199.959693  
199.960203  
199.960689  
199.961191  
199.961665  
199.962156  
199.962619  
199.963098  
199.963543  
199.964014  
199.964448  
199.964907  
199.965330  
199.965772  
199.966201  
199.966625  
199.967046  
199.967458  
199.967868  
199.968263  
199.968664  
199.969047  
199.969437  
199.969817  
199.970193  
199.970565  
199.970943  
199.971297  
199.971668  
199.972011  
199.972363  
199.972712  
199.973047  
199.973388  
199.973726  
199.974049  
199.974379  
199.974699  
199.975014  
199.975326  
199.975645  
199.975939  
199.976249  
199.976546  
199.976832  
199.977125  
199.977414  
199.977688  
199.977969  
199.978247  
199.978525  
199.978782  
199.979061  
199.979312  
199.979576  
199.979825  
199.980077  
199.980335  
199.980569  
199.980812  
199.981053  
199.981300  
199.981522  
199.981755  
199.981984  
199.982213  
199.982427  
199.982648  
199.982860  
199.983080  
199.983298  
199.983501  
199.983704  
199.983914  
199.984114  
199.984309  
199.984500  
199.984698  
199.984887  
199.985079  
199.985262  
199.985442  
199.985623  
199.985803  
199.985984  
199.986170  
199.986327  
199.986508  
199.986668  
199.986846  
199.987006  
199.987169  
199.987321  
199.987481  
199.987633  
199.987800  
199.987948  
199.988094  
199.988237  
199.988386  
199.988526  
199.988675  
199.988815  
199.988965  
199.989090  
199.989231  
199.989359  
199.989491  
199.989629  
199.989757  
199.989889  
199.990012  
199.990133  
199.990253  
199.990373  
199.990493  
199.990614  
199.990734  
199.990854  
199.990960  
199.991072  
199.991180  
199.991289  
199.991398  
199.991507  
199.991616  
199.991718  
199.991837  
199.991922  
199.992025  
199.992123  
199.992214  
199.992314  
199.992412  
199.992503  
199.992604  
199.992701  
199.992792  
199.992878  
199.992967  
199.993047  
199.993136  
199.993216  
199.993305  
199.993385  
199.993474  
199.993554  
199.993637  
199.993726  
199.993806  
199.993881  
199.993952  
199.994024  
199.994101  
199.994170  
199.994241  
199.994313  
199.994391  
199.994459  
199.994531  
199.994602  
199.994680  
199.994748  
199.994805  
199.994868  
199.994928  
199.994989  
199.995049  
199.995109  
199.995175  
199.995226  
199.995295  
199.995346  
199.995416  
199.995466  
199.995536  
199.995593  
199.995653  
199.995713  
199.995759  
199.995811  
199.995859  
199.995902  
199.995960  
199.995999  
199.996051  
199.996100  
199.996148  
199.996191  
199.996249  
199.996288  
199.996340  
199.996389  
199.996438  
199.996480  
199.996538  
199.996578  
199.996629  
199.996678  
199.996712  
199.996746  
199.996787  
199.996824  
199.996855  
199.996896  
199.996927  
199.996967  
199.997005  
199.997036  
199.997076  
199.997113  
199.997145  
199.997185  
199.997216  
199.997256  
199.997294  
199.997325  
199.997365  
199.997403  
199.997434  
199.997474  
199.997512  
199.997543  
199.997583  
199.997614  
199.997640  
199.997669  
199.997689  
199.997711  
199.997740  
199.997760  
199.997789  
199.997809  
199.997838  
199.997858  
199.997880  
199.997909  
199.997929  
199.997958  
199.997978  
199.998007  
199.998027  
199.998049  
199.998078  
199.998098  
199.998127  
199.998147  
199.998170  
199.998199  
199.998218  
199.998247  
199.998267  
199.998296  
199.998316  
199.998339  
199.998368  
199.998387  
199.998416  
199.998436  
199.998459  
199.998488  
199.998508  
199.998537  
199.998556  
199.998585  
199.998590  
199.998605  
199.998616  
199.998634  
199.998642  
199.998654  
199.998665  
199.998676  
199.998694  
199.998702  
199.998714  
199.998725  
199.998743  
199.998745  
199.998766  
199.998774  
199.998785  
199.998803  
199.998805  
199.998826  
199.998834  
199.998845  
199.998863  
199.998871  
199.998883  
199.998894  
199.998905  
199.998923  
199.998931  
199.998943  
199.998954  
199.998972  
199.998974  
199.998995  
199.999003  
199.999014  
199.999032  
199.999034  
199.999055  
199.999063  
199.999074  
199.999092  
199.999094  
199.999115  
199.999123  
199.999135  
199.999152  
199.999161  
199.999172  
199.999183  
199.999201  
199.999203  
199.999224  
199.999232  
199.999243  
199.999261  
199.999263  
199.999284  
199.999292  
199.999304  
199.999321  
199.999323  
199.999344  
199.999352  
199.999364  
199.999381  
199.999390  
199.999401  
199.999412  
199.999430  
199.999432  
199.999453  
199.999461  
199.999473

## PID控制算法的C语言实现四 增量型PID的C语言实现

   上一节中介绍了最简单的位置型PID的实现手段，这一节主要讲解增量式PID的实现方法，位置型和增量型PID的数学公式请参见我的系列文《PID控制算法的C语言实现二》中的讲解。实现过程仍然是分为定义变量、初始化变量、实现控制算法函数、算法测试四个部分，详细分类请参加《PID控制算法的C语言实现三》中的讲解，这里直接给出代码了。  
#include<stdio.h>  
#include<stdlib.h>  
  
struct \_pid{  
    float SetSpeed;            //定义设定值  
    float ActualSpeed;        //定义实际值  
    float err;                //定义偏差值  
    float err\_next;            //定义上一个偏差值  
    float err\_last;            //定义最上前的偏差值  
    float Kp,Ki,Kd;            //定义比例、积分、微分系数  
}pid;  
  
void PID\_init(){  
    pid.SetSpeed=0.0;  
    pid.ActualSpeed=0.0;  
    pid.err=0.0;  
    pid.err\_last=0.0;  
    pid.err\_next=0.0;  
    pid.Kp=0.2;  
    pid.Ki=0.015;  
    pid.Kd=0.2;  
}  
  
float PID\_realize(float speed){  
    pid.SetSpeed=speed;  
    pid.err=pid.SetSpeed-pid.ActualSpeed;  
    float incrementSpeed=pid.Kp\*(pid.err-pid.err\_next)+pid.Ki\*pid.err+pid.Kd\*(pid.err-2\*pid.err\_next+pid.err\_last);  
    pid.ActualSpeed+=incrementSpeed;  
    pid.err\_last=pid.err\_next;  
    pid.err\_next=pid.err;  
    return pid.ActualSpeed;  
}  
  
int main(){  
    PID\_init();  
    int count=0;  
    while(count<1000)  
    {  
        float speed=PID\_realize(200.0);  
        printf("%f\n",speed);  
        count++;  
    }  
    return 0;  
}  
  
运行后的1000个数据为：

83.000000  
11.555000  
59.559677  
28.175406  
52.907425  
38.944149  
51.891701  
46.141655  
53.339050  
51.510002  
55.908447  
55.944637  
58.970676  
59.882942  
62.224998  
63.537247  
65.527702  
67.011047  
68.810638  
70.355309  
72.042023  
73.595642  
75.207603  
76.745430  
78.301514  
79.812126  
81.321915  
82.800293  
84.268898  
85.713097  
87.143440  
88.552994  
89.946945  
91.322067  
92.680977  
94.022224  
95.347176  
96.655235  
97.947174  
99.222801  
100.482597  
101.726562  
102.955040  
104.168114  
105.366058  
106.549004  
107.717178  
108.870743  
110.009888  
111.134796  
112.245636  
113.342598  
114.425842  
115.495552  
116.551880  
117.595009  
118.625099  
119.642311  
120.646812  
121.638756  
122.618294  
123.585594  
124.540794  
125.484062  
126.415535  
127.335365  
128.243698  
129.140671  
130.026443  
130.901138  
131.764893  
132.617859  
133.460159  
134.291931  
135.113297  
135.924408  
136.725372  
137.516327  
138.297394  
139.068695  
139.830353  
140.582489  
141.325226  
142.058685  
142.782974  
143.498199  
144.204498  
144.901962  
145.590714  
146.270844  
146.942474  
147.605713  
148.260651  
148.907410  
149.546082  
150.176773  
150.799576  
151.414597  
152.021927  
152.621674  
153.213913  
153.798752  
154.376282  
154.946594  
155.509781  
156.065918  
156.615112  
157.157440  
157.692993  
158.221848  
158.744095  
159.259811  
159.769073  
160.271973  
160.768585  
161.258987  
161.743271  
162.221481  
162.693726  
163.160065  
163.620575  
164.075333  
164.524399  
164.967865  
165.405777  
165.838226  
166.265259  
166.686951  
167.103378  
167.514587  
167.920670  
168.321671  
168.717667  
169.108704  
169.494858  
169.876175  
170.252731  
170.624588  
170.991791  
171.354401  
171.712479  
172.066086  
172.415268  
172.760086  
173.100601  
173.436844  
173.768890  
174.096786  
174.420578  
174.740326  
175.056076  
175.367889  
175.675797  
175.979858  
176.280121  
176.576630  
176.869431  
177.158569  
177.444092  
177.726044  
178.004471  
178.279419  
178.550934  
178.819046  
179.083817  
179.345276  
179.603470  
179.858429  
180.110214  
180.358841  
180.604370  
180.846817  
181.086243  
181.322662  
181.556137  
181.786682  
182.014359  
182.239182  
182.461197  
182.680435  
182.896942  
183.110733  
183.321854  
183.530334  
183.736206  
183.939514  
184.140274  
184.338531  
184.534302  
184.727631  
184.918533  
185.107056  
185.293228  
185.477066  
185.658615  
185.837891  
186.014923  
186.189743  
186.362381  
186.532852  
186.701202  
186.867432  
187.031601  
187.193710  
187.353790  
187.511871  
187.667984  
187.822128  
187.974365  
188.124680  
188.273132  
188.419724  
188.564484  
188.707428  
188.848587  
188.987976  
189.125626  
189.261566  
189.395798  
189.528351  
189.659256  
189.788513  
189.916168  
190.042221  
190.166702  
190.289627  
190.411011  
190.530884  
190.649246  
190.766144  
190.881561  
190.995544  
191.108109  
191.219254  
191.329025  
191.437408  
191.544449  
191.650146  
191.754517  
191.857590  
191.959366  
192.059875  
192.159134  
192.257141  
192.353928  
192.449509  
192.543884  
192.637085  
192.729126  
192.820007  
192.909760  
192.998383  
193.085907  
193.172333  
193.257675  
193.341965  
193.425186  
193.507385  
193.588531  
193.668686  
193.747818  
193.825974  
193.903152  
193.979370  
194.054626  
194.128952  
194.202332  
194.274811  
194.346375  
194.417053  
194.486832  
194.555756  
194.623810  
194.691010  
194.757370  
194.822906  
194.887619  
194.951523  
195.014633  
195.076950  
195.138489  
195.199265  
195.259277  
195.318542  
195.377060  
195.434845  
195.491913  
195.548264  
195.603912  
195.658859  
195.713135  
195.766724  
195.819641  
195.871902  
195.923508  
195.974472  
196.024796  
196.074493  
196.123566  
196.172028  
196.219879  
196.267136  
196.313797  
196.359879  
196.405380  
196.450317  
196.494690  
196.538513  
196.581787  
196.624512  
196.666702  
196.708374  
196.749512  
196.790146  
196.830261  
196.869888  
196.909012  
196.947647  
196.985809  
197.023483  
197.060699  
197.097443  
197.133728  
197.169556  
197.204941  
197.239883  
197.274384  
197.308456  
197.342102  
197.375320  
197.408127  
197.440521  
197.472519  
197.504105  
197.535309  
197.566116  
197.596542  
197.626587  
197.656250  
197.685547  
197.714478  
197.743042  
197.771255  
197.799118  
197.826630  
197.853806  
197.880630  
197.907120  
197.933289  
197.959122  
197.984634  
198.009827  
198.034698  
198.059265  
198.083527  
198.107483  
198.131134  
198.154495  
198.177567  
198.200348  
198.222839  
198.245056  
198.266998  
198.288666  
198.310059  
198.331177  
198.352036  
198.372635  
198.392975  
198.413071  
198.432907  
198.452499  
198.471848  
198.490952  
198.509811  
198.528442  
198.546829  
198.565002  
198.582932  
198.600647  
198.618134  
198.635406  
198.652466  
198.669312  
198.685944  
198.702377  
198.718597  
198.734619  
198.750443  
198.766068  
198.781494  
198.796722  
198.811768  
198.826614  
198.841278  
198.855759  
198.870056  
198.884186  
198.898132  
198.911911  
198.925507  
198.938934  
198.952194  
198.965286  
198.978226  
198.990997  
199.003616  
199.016068  
199.028366  
199.040512  
199.052505  
199.064346  
199.076050  
199.087601  
199.099014  
199.110275  
199.121399  
199.132385  
199.143234  
199.153946  
199.164520  
199.174973  
199.185287  
199.195465  
199.205521  
199.215454  
199.225266  
199.234955  
199.244522  
199.253967  
199.263290  
199.272507  
199.281601  
199.290588  
199.299454  
199.308212  
199.316864  
199.325409  
199.333847  
199.342178  
199.350403  
199.358521  
199.366547  
199.374466  
199.382294  
199.390015  
199.397644  
199.405167  
199.412613  
199.419952  
199.427200  
199.434357  
199.441422  
199.448410  
199.455307  
199.462112  
199.468842  
199.475479  
199.482040  
199.488510  
199.494904  
199.501221  
199.507462  
199.513611  
199.519699  
199.525696  
199.531631  
199.537476  
199.543259  
199.548965  
199.554611  
199.560181  
199.565674  
199.571106  
199.576462  
199.581757  
199.586990  
199.592148  
199.597244  
199.602280  
199.607254  
199.612167  
199.617020  
199.621811  
199.626541  
199.631210  
199.635818  
199.640366  
199.644867  
199.649307  
199.653687  
199.658020  
199.662292  
199.666519  
199.670685  
199.674805  
199.678864  
199.682877  
199.686844  
199.690750  
199.694626  
199.698441  
199.702209  
199.705933  
199.709610  
199.713242  
199.716827  
199.720367  
199.723862  
199.727310  
199.730713  
199.734085  
199.737411  
199.740692  
199.743942  
199.747147  
199.750305  
199.753433  
199.756516  
199.759567  
199.762573  
199.765549  
199.768478  
199.771378  
199.774231  
199.777054  
199.779846  
199.782593  
199.785309  
199.787994  
199.790649  
199.793259  
199.795853  
199.798401  
199.800919  
199.803406  
199.805862  
199.808289  
199.810684  
199.813049  
199.815384  
199.817688  
199.819962  
199.822220  
199.824432  
199.826630  
199.828796  
199.830933  
199.833054  
199.835144  
199.837204  
199.839233  
199.841248  
199.843231  
199.845200  
199.847137  
199.849045  
199.850937  
199.852798  
199.854645  
199.856461  
199.858261  
199.860031  
199.861786  
199.863510  
199.865219  
199.866898  
199.868561  
199.870209  
199.871826  
199.873428  
199.875015  
199.876572  
199.878113  
199.879639  
199.881149  
199.882629  
199.884094  
199.885544  
199.886978  
199.888397  
199.889786  
199.891174  
199.892532  
199.893875  
199.895203  
199.896515  
199.897812  
199.899094  
199.900360  
199.901611  
199.902847  
199.904068  
199.905273  
199.906464  
199.907639  
199.908798  
199.909943  
199.911072  
199.912186  
199.913284  
199.914368  
199.915436  
199.916489  
199.917526  
199.918564  
199.919571  
199.920578  
199.921570  
199.922546  
199.923523  
199.924469  
199.925415  
199.926346  
199.927261  
199.928177  
199.929077  
199.929962  
199.930832  
199.931702  
199.932556  
199.933395  
199.934235  
199.935059  
199.935867  
199.936676  
199.937469  
199.938248  
199.939026  
199.939789  
199.940536  
199.941284  
199.942017  
199.942749  
199.943466  
199.944168  
199.944870  
199.945557  
199.946243  
199.946915  
199.947586  
199.948242  
199.948883  
199.949524  
199.950150  
199.950775  
199.951385  
199.951996  
199.952591  
199.953186  
199.953766  
199.954346  
199.954910  
199.955475  
199.956024  
199.956573  
199.957108  
199.957642  
199.958176  
199.958694  
199.959213  
199.959717  
199.960220  
199.960724  
199.961212  
199.961700  
199.962173  
199.962646  
199.963120  
199.963577  
199.964035  
199.964478  
199.964920  
199.965363  
199.965790  
199.966217  
199.966644  
199.967056  
199.967468  
199.967880  
199.968277  
199.968674  
199.969070  
199.969452  
199.969833  
199.970215  
199.970581  
199.970947  
199.971313  
199.971664  
199.972015  
199.972366  
199.972717  
199.973053  
199.973389  
199.973724  
199.974045  
199.974380  
199.974701  
199.975021  
199.975327  
199.975632  
199.975937  
199.976242  
199.976532  
199.976822  
199.977112  
199.977402  
199.977676  
199.977966  
199.978241  
199.978516  
199.978790  
199.979050  
199.979309  
199.979568  
199.979828  
199.980072  
199.980331  
199.980576  
199.980820  
199.981064  
199.981293  
199.981537  
199.981766  
199.981995  
199.982224  
199.982437  
199.982666  
199.982880  
199.983093  
199.983307  
199.983521  
199.983719  
199.983932  
199.984131  
199.984329  
199.984528  
199.984726  
199.984909  
199.985107  
199.985291  
199.985474  
199.985657  
199.985840  
199.986023  
199.986191  
199.986374  
199.986542  
199.986710  
199.986877  
199.987045  
199.987213  
199.987366  
199.987534  
199.987686  
199.987839  
199.987991  
199.988144  
199.988297  
199.988449  
199.988586  
199.988739  
199.988876  
199.989014  
199.989151  
199.989288  
199.989426  
199.989563  
199.989685  
199.989822  
199.989944  
199.990067  
199.990189  
199.990311  
199.990433  
199.990555  
199.990677  
199.990799  
199.990906  
199.991028  
199.991135  
199.991257  
199.991364  
199.991470  
199.991577  
199.991684  
199.991791  
199.991898  
199.992004  
199.992096  
199.992203  
199.992294  
199.992401  
199.992493  
199.992584  
199.992676  
199.992767  
199.992859  
199.992950  
199.993042  
199.993134  
199.993225  
199.993301  
199.993393  
199.993469  
199.993561  
199.993637  
199.993713  
199.993790  
199.993866  
199.993942  
199.994019  
199.994095  
199.994171  
199.994247  
199.994324  
199.994400  
199.994476  
199.994537  
199.994614  
199.994675  
199.994751  
199.994812  
199.994873  
199.994934  
199.994995  
199.995056  
199.995117  
199.995178  
199.995239  
199.995300  
199.995361  
199.995422  
199.995483  
199.995544  
199.995605  
199.995667  
199.995712  
199.995773  
199.995819  
199.995880  
199.995926  
199.995987  
199.996033  
199.996094  
199.996140  
199.996185  
199.996231  
199.996277  
199.996323  
199.996368  
199.996414  
199.996460  
199.996506  
199.996552  
199.996597  
199.996643  
199.996689  
199.996735  
199.996780  
199.996826  
199.996872  
199.996902  
199.996948  
199.996979  
199.997025  
199.997055  
199.997101  
199.997131  
199.997177  
199.997208  
199.997253  
199.997284  
199.997314  
199.997345  
199.997375  
199.997406  
199.997437  
199.997467  
199.997498  
199.997528  
199.997559  
199.997589  
199.997620  
199.997650  
199.997681  
199.997711  
199.997742  
199.997772  
199.997803  
199.997833  
199.997864  
199.997894  
199.997925  
199.997955  
199.997986  
199.998016  
199.998047  
199.998077  
199.998093  
199.998123  
199.998138  
199.998169  
199.998184  
199.998215  
199.998230  
199.998260  
199.998276  
199.998306  
199.998322  
199.998352  
199.998367  
199.998398  
199.998413  
199.998444  
199.998459  
199.998489  
199.998505  
199.998520  
199.998535  
199.998550  
199.998566  
199.998581  
199.998596  
199.998611  
199.998627  
199.998642  
199.998657  
199.998672  
199.998688  
199.998703  
199.998718  
199.998734  
199.998749  
199.998764  
199.998779  
199.998795  
199.998810  
199.998825  
199.998840  
199.998856  
199.998871  
199.998886  
199.998901  
199.998917  
199.998932  
199.998947  
199.998962  
199.998978  
199.998993  
199.999008  
199.999023  
199.999039  
199.999054  
199.999069  
199.999084  
199.999100  
199.999115  
199.999130  
199.999146  
199.999161  
199.999176  
199.999191  
199.999207  
199.999222  
199.999237  
199.999252  
199.999268  
199.999283  
199.999298  
199.999298  
199.999313  
199.999313  
199.999329  
199.999329  
199.999344  
199.999344  
199.999359  
199.999359  
199.999374  
199.999374  
199.999390  
199.999390  
199.999405  
199.999405  
199.999420  
199.999420  
199.999435  
199.999435  
199.999451  
199.999451  
199.999466  
199.999466  
199.999481  
199.999481  
199.999496  
199.999496  
199.999512  
199.999512

## PID控制算法的C语言实现五 积分分离的PID控制算法C语言实现

    通过三、四两篇文章，基本上已经弄清楚了PID控制算法的最常规的表达方法。在普通PID控制中，引入积分环节的目的，主要是为了消除静差，提高控制精度。但是在启动、结束或大幅度增减设定时，短时间内系统输出有很大的偏差，会造成PID运算的积分积累，导致控制量超过执行机构可能允许的最大动作范围对应极限控制量，从而引起较大的超调，甚至是震荡，这是绝对不允许的。

   为了克服这一问题，引入了积分分离的概念，其基本思路是 当被控量与设定值偏差较大时，取消积分作用; 当被控量接近给定值时，引入积分控制，以消除静差，提高精度。其具体实现代码如下：

    pid.Kp=0.2;  
    pid.Ki=0.04;  
    pid.Kd=0.2;  //初始化过程

if(abs(pid.err)>200)  
    {  
    index=0;  
    }else{  
    index=1;  
    pid.integral+=pid.err;  
    }  
    pid.voltage=pid.Kp\*pid.err+index\*pid.Ki\*pid.integral+pid.Kd\*(pid.err-pid.err\_last);    //算法具体实现过程

其它部分的代码参见《PID控制算法的C语言实现三》中的讲解，不再赘述。同样采集1000个量，会发现，系统到199所有的时间是原来时间的1/2,系统的快速性得到了提高。

199.003571  
199.036804  
199.068924  
199.099960  
199.129974  
199.158981  
199.187012  
199.214111  
199.240311  
199.265640  
199.290115  
199.313797  
199.336655  
199.358795  
199.380157  
199.400818  
199.420792  
199.440109  
199.458771  
199.476807  
199.494263  
199.511124  
199.527420  
199.543182  
199.558426  
199.573135  
199.587372  
199.601120  
199.614426  
199.627289  
199.639694  
199.651718  
199.663315  
199.674561  
199.685410  
199.695908  
199.706039  
199.715851  
199.725311  
199.734482  
199.743332  
199.751907  
199.760162  
199.768173  
199.775894  
199.783371  
199.790588  
199.797577  
199.804337  
199.810867  
199.817154  
199.823257  
199.829147  
199.834839  
199.840347  
199.845673  
199.850815  
199.855789  
199.860596  
199.865234  
199.869736  
199.874069  
199.878281  
199.882324  
199.886261  
199.890045  
199.893707  
199.897263  
199.900665  
199.903992  
199.907181  
199.910278  
199.913284  
199.916168  
199.918976  
199.921677  
199.924286  
199.926804  
199.929245  
199.931610  
199.933884  
199.936081  
199.938217  
199.940277  
199.942276  
199.944183  
199.946045  
199.947830  
199.949585  
199.951248  
199.952896  
199.954437  
199.955963  
199.957428  
199.958847  
199.960205  
199.961548  
199.962830  
199.964066  
199.965271  
199.966431  
199.967545  
199.968628  
199.969666  
199.970673  
199.971649  
199.972595  
199.973511  
199.974380  
199.975235  
199.976074  
199.976852  
199.977631  
199.978378  
199.979095  
199.979797  
199.980453  
199.981125  
199.981735  
199.982361  
199.982925  
199.983505  
199.984055  
199.984604  
199.985107  
199.985611  
199.986069  
199.986557  
199.987000  
199.987442  
199.987869  
199.988281  
199.988663  
199.989044  
199.989395  
199.989761  
199.990097  
199.990417  
199.990753  
199.991058  
199.991348  
199.991653  
199.991913  
199.992203  
199.992447  
199.992706  
199.992950  
199.993179  
199.993408  
199.993607  
199.993835  
199.994034  
199.994232  
199.994431  
199.994598  
199.994797  
199.994965  
199.995132  
199.995285  
199.995453  
199.995605  
199.995743  
199.995895  
199.996017  
199.996155  
199.996277  
199.996414  
199.996521  
199.996643  
199.996750  
199.996872  
199.996964  
199.997070  
199.997162  
199.997269  
199.997360  
199.997437  
199.997528  
199.997604  
199.997681  
199.997772  
199.997849  
199.997910  
199.997986  
199.998047  
199.998108  
199.998169  
199.998245  
199.998306  
199.998352  
199.998398  
199.998459  
199.998489  
199.998550  
199.998596  
199.998642  
199.998703  
199.998734  
199.998795  
199.998825  
199.998856  
199.998886  
199.998917  
199.998962  
199.998978  
199.999023  
199.999054  
199.999084  
199.999115  
199.999146  
199.999191  
199.999207  
199.999252  
199.999283  
199.999298  
199.999313  
199.999329  
199.999344  
199.999359  
199.999374  
199.999390  
199.999405  
199.999435  
199.999435  
199.999466  
199.999466  
199.999496  
199.999512  
199.999527  
199.999542  
199.999557  
199.999573  
199.999588  
199.999603  
199.999619  
199.999634  
199.999649  
199.999680  
199.999680  
199.999710  
199.999710  
199.999741  
199.999756  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771  
199.999771

## PID控制算法的C语言实现六 抗积分饱和的PID控制算法C语言实现

   所谓的积分饱和现象是指如果系统存在一个方向的偏差，PID控制器的输出由于积分作用的不断累加而加大，从而导致执行机构达到极限位置，若控制器输出U(k)继续增大，执行器开度不可能再增大，此时计算机输出控制量超出了正常运行范围而进入饱和区。一旦系统出现反向偏差，u(k)逐渐从饱和区退出。进入饱和区越深则退出饱和区时间越长。在这段时间里，执行机构仍然停留在极限位置而不随偏差反向而立即做出相应的改变，这时系统就像失控一样，造成控制性能恶化，这种现象称为积分饱和现象或积分失控现象。

    防止积分饱和的方法之一就是抗积分饱和法，该方法的思路是在计算u(k)时，首先判断上一时刻的控制量u(k-1)是否已经超出了极限范围： 如果u(k-1)>umax，则只累加负偏差; 如果u(k-1)<umin，则只累加正偏差。从而避免控制量长时间停留在饱和区。直接贴出代码，不懂的看看前面几节的介绍。

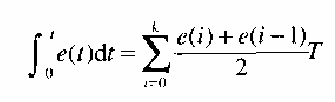
struct \_pid{  
    float SetSpeed;            //定义设定值  
    float ActualSpeed;        //定义实际值  
    float err;                //定义偏差值  
    float err\_last;            //定义上一个偏差值  
    float Kp,Ki,Kd;            //定义比例、积分、微分系数  
    float voltage;            //定义电压值（控制执行器的变量）  
    float integral;            //定义积分值  
    float umax;  
    float umin;  
}pid;  
  
void PID\_init(){  
    printf("PID\_init begin \n");  
    pid.SetSpeed=0.0;  
    pid.ActualSpeed=0.0;  
    pid.err=0.0;  
    pid.err\_last=0.0;  
    pid.voltage=0.0;  
    pid.integral=0.0;  
    pid.Kp=0.2;  
   pid.Ki=0.1;       //注意，和上几次相比，这里加大了积分环节的值  
    pid.Kd=0.2;  
    pid.umax=400;  
    pid.umin=-200;  
    printf("PID\_init end \n");  
}  
float PID\_realize(float speed){  
    int index;  
    pid.SetSpeed=speed;  
    pid.err=pid.SetSpeed-pid.ActualSpeed;  
  
   if(pid.ActualSpeed>pid.umax)  //灰色底色表示抗积分饱和的实现  
    {  
  
       if(abs(pid.err)>200)      //蓝色标注为积分分离过程  
        {  
            index=0;  
        }else{  
            index=1;  
            if(pid.err<0)  
            {  
             pid.integral+=pid.err;  
            }  
        }  
    }else if(pid.ActualSpeed<pid.umin){  
        if(abs(pid.err)>200)      //积分分离过程  
        {  
            index=0;  
        }else{  
            index=1;  
            if(pid.err>0)  
            {  
            pid.integral+=pid.err;  
            }  
        }  
    }else{  
        if(abs(pid.err)>200)                    //积分分离过程  
        {  
            index=0;  
        }else{  
            index=1;  
            pid.integral+=pid.err;  
        }  
    }  
  
    pid.voltage=pid.Kp\*pid.err+index\*pid.Ki\*pid.integral+pid.Kd\*(pid.err-pid.err\_last);  
  
    pid.err\_last=pid.err;  
    pid.ActualSpeed=pid.voltage\*1.0;  
    return pid.ActualSpeed;  
}

最终的测试程序运算结果如下，可以明显的看出系统的稳定时间相对前几次来讲缩短了不少。

100.000000  
30.000000  
95.000000  
65.500000  
103.750000  
92.175003  
115.237503  
112.173752  
126.794380  
127.653938  
137.468842  
139.967911  
146.934479  
149.954224  
155.144211  
158.157745  
162.174561  
164.953079  
168.149734  
170.611786  
173.205124  
175.339691  
177.470551  
179.298065  
181.063431  
182.616440  
184.086655  
185.400513  
186.628952  
187.737457  
188.766006  
189.699692  
190.561951  
191.347580  
192.071030  
192.731674  
193.338928  
193.894257  
194.404160  
194.870834  
195.299072  
195.691193  
196.050888  
196.380341  
196.682465  
196.959244  
197.213043  
197.445572  
197.658768  
197.854111  
198.033203  
198.197311  
198.347763  
198.485626  
198.612015  
198.727829  
198.834000  
198.931290  
199.020477  
199.102219  
199.177139  
199.245804  
199.308746  
199.366425  
199.419296  
199.467758  
199.512161  
199.552872  
199.590179  
199.624390  
199.655716  
199.684464  
199.710785  
199.734924  
199.757034  
199.777298  
199.795883  
199.812912  
199.828537  
199.842834  
199.855972  
199.867981  
199.879013  
199.889099  
199.898361  
199.906845  
199.914612  
199.921753  
199.928268  
199.934280  
199.939743  
199.944794  
199.949371  
199.953629  
199.957474  
199.961029  
199.964279  
199.967270  
199.969986  
199.972504  
199.974792  
199.976898  
199.978821  
199.980591  
199.982208  
199.983688  
199.985062  
199.986298  
199.987442  
199.988495  
199.989441  
199.990326  
199.991135  
199.991867  
199.992554  
199.993179  
199.993744  
199.994263  
199.994751  
199.995178  
199.995590  
199.995941  
199.996292  
199.996582  
199.996887  
199.997116  
199.997391  
199.997574  
199.997803  
199.997971  
199.998154  
199.998291  
199.998444  
199.998581  
199.998703  
199.998810  
199.998917  
199.999008  
199.999084  
199.999176  
199.999237  
199.999298  
199.999359  
199.999405  
199.999466  
199.999496  
199.999542  
199.999588  
199.999619  
199.999649  
199.999680  
199.999710  
199.999725  
199.999756  
199.999771  
199.999786  
199.999817  
199.999817  
199.999847  
199.999847  
199.999863  
199.999863  
199.999878  
199.999893  
199.999893  
199.999908  
199.999924  
199.999924  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939  
199.999939

## PID控制算法的C语言实现七 梯形积分的PID控制算法C语言实现

   先看一下梯形算法的积分环节公式



   作为PID控制律的积分项，其作用是消除余差，为了尽量减小余差，应提高积分项运算精度，为此可以将矩形积分改为梯形积分，具体实现的语句为：

pid.voltage=pid.Kp\*pid.err+index\*pid.Ki\*pid.integral/2+pid.Kd\*(pid.err-pid.err\_last);  //梯形积分

其它函数请参见本系列教程六中的介绍

最后运算的稳定数据为：199.999878，较教程六中的199.9999390而言，精度进一步提高。

## PID控制算法的C语言实现八 变积分的PID控制算法C语言实现

   变积分PID可以看成是积分分离的PID算法的更一般的形式。在普通的PID控制算法中，由于积分系数ki是常数，所以在整个控制过程中，积分增量是不变的。但是，系统对于积分项的要求是，系统偏差大时，积分作用应该减弱甚至是全无，而在偏差小时，则应该加强。积分系数取大了会产生超调，甚至积分饱和，取小了又不能短时间内消除静差。因此，根据系统的偏差大小改变积分速度是有必要的。

   变积分PID的基本思想是设法改变积分项的累加速度，使其与偏差大小相对应：偏差越大，积分越慢; 偏差越小，积分越快。

   这里给积分系数前加上一个比例值index：

   当abs(err)<180时，index=1;

   当180<abs(err)<200时，index=（200-abs(err)）/20;

   当abs(err)>200时，index=0;

   最终的比例环节的比例系数值为ki\*index;

   具体PID实现代码如下：

    pid.Kp=0.4;  
    pid.Ki=0.2;    //增加了积分系数  
    pid.Kd=0.2;

   float PID\_realize(float speed){  
    float index;  
    pid.SetSpeed=speed;  
    pid.err=pid.SetSpeed-pid.ActualSpeed;  
  
    if(abs(pid.err)>200)           //变积分过程  
    {  
    index=0.0;  
    }else if(abs(pid.err)<180){  
    index=1.0;  
    pid.integral+=pid.err;  
    }else{  
    index=(200-abs(pid.err))/20;  
    pid.integral+=pid.err;  
    }  
    pid.voltage=pid.Kp\*pid.err+index\*pid.Ki\*pid.integral+pid.Kd\*(pid.err-pid.err\_last);  
  
    pid.err\_last=pid.err;  
    pid.ActualSpeed=pid.voltage\*1.0;  
    return pid.ActualSpeed;  
}

最终结果可以看出，系统的稳定速度非常快（测试程序参见本系列教程3）：

120.000000  
64.000000  
148.800003  
96.959999  
165.632004  
120.934395  
177.300476  
139.081223  
185.469742  
152.898834  
191.139313  
163.452988  
195.022278  
171.538986  
197.635025  
177.753738  
199.350967  
182.546188  
200.439255  
186.254608  
201.093094  
189.134460  
201.450439  
191.379044  
201.609268  
193.135010  
201.638611  
194.513870  
201.586670  
195.600708  
201.486694  
196.460571  
201.361328  
197.143387  
201.225632  
197.687561  
201.089340  
198.122787  
200.958511  
198.472076  
200.836655  
198.753296  
200.725555  
198.980423  
200.625870  
199.164398  
200.537506  
199.313843  
200.459900  
199.435547  
200.392258  
199.534912  
200.333679  
199.616211  
200.283203  
199.682877  
200.239899  
199.737640  
200.202866  
199.782700  
200.171295  
199.819855  
200.144470  
199.850525  
200.121704  
199.875870  
200.102432  
199.896851  
200.086136  
199.914230  
200.072372  
199.928635  
200.060776  
199.940582  
200.051010  
199.950500  
200.042801  
199.958755  
200.035904  
199.965622  
200.030090  
199.971344  
200.025223  
199.976105  
200.021118  
199.980057  
200.017700  
199.983353  
200.014832  
199.986099  
200.012421  
199.988403  
200.010391  
199.990326  
200.008698  
199.991928  
200.007263  
199.993256  
200.006088  
199.994370  
200.005081  
199.995300  
200.004257  
199.996063  
200.003555  
199.996719  
200.002975  
199.997253  
200.002487  
199.997711  
200.002075  
199.998077  
200.001740  
199.998398  
200.001465  
199.998657  
200.001221  
199.998886  
200.001007  
199.999084  
200.000839  
199.999237  
200.000702  
199.999359  
200.000580  
199.999451  
200.000488  
199.999542  
200.000397  
199.999619  
200.000336  
199.999680  
200.000275  
199.999725  
200.000229  
199.999756  
200.000198  
199.999802  
200.000168  
199.999832  
200.000137  
199.999863  
200.000107  
199.999893  
200.000092  
199.999908  
200.000076  
199.999924  
200.000061  
199.999939  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046  
199.999954  
200.000046

## PID控制算法的C语言实现九 专家PID与模糊PID的C语言实现

   本节是PID控制算法的C语言实现系列的最后一节，前面8节中，已经分别从PID的实现到深入的过程进行了一个简要的讲解，从前面的讲解中不难看出，PID的控制思想非常简单，其主要问题点和难点在于比例、积分、微分环节上的参数整定过程，对于执行器控制模型确定或者控制模型简单的系统而言，参数的整定可以通过计算获得，对于一般精度要求不是很高的执行器系统，可以采用拼凑的方法进行实验型的整定。

   然而，在实际的控制系统中，线性系统毕竟是少数，大部分的系统属于非线性系统，或者说是系统模型不确定的系统，如果控制精度要求较高的话，那么对于参数的整定过程是有难度的。专家PID和模糊PID就是为满足这方面的需求而设计的。专家算法和模糊算法都归属于智能算法的范畴，智能算法最大的优点就是在控制模型未知的情况下，可以对模型进行控制。这里需要注意的是，专家PID也好，模糊PID也罢，绝对不是专家系统或模糊算法与PID控制算法的简单加和，他是专家系统或者模糊算法在PID控制器参数整定上的应用。也就是说，智能算法是辅助PID进行参数整定的手段。

   其实在前面几节的讲述中，已经用到了专家PID的一些特例行为了，从第五节到第八节都是专家系统一些特列化的算法，对某些条件进行了局部的判定，比如如果偏差太大的话，就去除积分项，这本身就是含有经验的专家系统。

   专家系统、模糊算法，需要参数整定就一定要有整定的依据，也就是说什么情况下整定什么值是要有依据的，这个依据是一些逻辑的组合，只要找出其中的逻辑组合关系来，这些依据就再明显不过了。下面先说一下专家PID的C语言实现。正如前面所说，需要找到一些依据，还得从PID系数本身说起。

   1.比例系数Kp的作用是加快系统的响应速度，提高系统的调节精度。Kp越大，系统的响应速度越快，系统的调节精度越高，但是容易产生超调，甚至会使系统不稳定。Kp取值过小，则会降低调节精度，使响应速度缓慢，从而延长调节时间，是系统静态、动态特性变差；

   2.积分作用系数Ki的作用是消除系统的稳态误差。Ki越大，系统的静态误差消除的越快，但是Ki过大，在响应过程的初期会产生积分饱和的现象，从而引起响应过程的较大超调。若Ki过小，将使系统静态误差难以消除，影响系统的调节精度；

   3.微分系数Kd的作用是改善系统的动态特性，其作用主要是在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化，对偏差变化进行提前预报。但是kd过大，会使响应过程提前制动，从而延长调节时间，而且会降低系统的抗干扰性。

   反应系统性能的两个参数是系统误差e和误差变化律ec，这点还是好理解的：

    首先我们规定一个误差的极限值，假设为Mmax；规定一个误差的比较大的值，假设为Mmid；规定一个误差的较小值，假设为Mmin；

   当abs（e）>Mmax时，说明误差的绝对值已经很大了，不论误差变化趋势如何，都应该考虑控制器的输入应按最大（或最小）输出，以达到迅速调整误差的效果，使误差绝对值以最大的速度减小。此时，相当于实施开环控制。

   当e\*ec>0时，说明误差在朝向误差绝对值增大的方向变化，此时，如果abs(e)>Mmid，说明误差也较大，可考虑由控制器实施较强的控制作用，以达到扭转误差绝对值向减小的方向变化，并迅速减小误差的绝对值。此时如果abs(e)<Mmid，说明尽管误差是向绝对值增大的方向变化，但是误差绝对值本身并不是很大，可以考虑控制器实施一般的控制作用，只需要扭转误差的变化趋势，使其向误差绝对值减小的方向变化即可。

   当e\*err<0且e\*err(k-1)>0或者e=0时，说明误差的绝对值向减小的方向变化，或者已经达到平衡状态，此时保持控制器输出不变即可。

   当e\*err<0且e\*err(k-1)<0时，说明误差处于极限状态。如果此时误差的绝对值较大，大于Mmin，可以考虑实施较强控制作用。如果此时误差绝对值较小，可以考虑实施较弱控制作用。

   当abs(e)<Mmin时，说明误差绝对值很小，此时加入积分，减小静态误差。

上面的逻辑判断过程，实际上就是对于控制系统的一个专家判断过程。（未完待续）

## PID控制算法的C语言实现十 模糊算法简介

  在PID控制算法的C语言实现九中，文章已经对模糊PID的实质做了一个简要说明。本来打算等到完成毕业设计，工作稳定了再着力完成剩下的部分。鉴于网友的要求和信任，抽出时间来，对模糊PID做一个较为详细的论述，这里我不打算做出仿真程序了，但就基本概念和思路进行一下说明，相信有C语言基础的朋友可以通过这些介绍性的文字自行实现。这篇文章主要说明一下模糊算法的含义和原理。

  实际上模糊算法属于智能算法，智能算法也可以叫非模型算法，也就是说，当我们对于系统的模型认识不是很深刻，或者说客观的原因导致我们无法对系统的控制模型进行深入研究的时候，智能算法常常能够起到不小的作用。这点是方便理解的，如果一个系统的模型可以轻易的获得，那么就可以根据系统的模型进行模型分析，设计出适合系统模型的控制器。但是现实世界中，可以说所有的系统都是非线性的，是不可预测的。但这并不是说我们就无从建立控制器，因为，大部分的系统在一定的条件和范围内是可以抽象成为线性系统的。问题的关键是，当我们系统设计的范围超出了线性的范围，我们又该如何处理。显然，智能算法是一条很不错的途径。智能算法包含了专家系统、模糊算法、遗传算法、神经网络算法等。其实这其中的任何一种算法都可以跟PID去做结合，而选择的关键在于，处理的实时性能不能得到满足。当我们处理器的速度足够快速时，我们可以选择更为复杂的、精度更加高的算法。但是，控制器的处理速度限制了我们算法的选择。当然，成本是限制处理器速度最根本的原因。这个道理很简单，51单片机和DSP的成本肯定大不相同。专家PID和模糊PID是常用的两种PID选择方式。其实，模糊PID适应一般的控制系统是没有问题。文章接下来将说明模糊算法的一些基本常识。

  模糊算法其实并不模糊。模糊算法其实也是逐次求精的过程。这里举个例子说明。我们设计一个倒立摆系统，假如摆针偏差＜5°，我们说它的偏差比较“小”；摆针偏差在5°和10°之间，我们说它的偏差处于“中”的状态；当摆针偏差＞10°的时候，我们说它的偏差有点儿“大”了。对于“小”、“中”、“大”这样的词汇来讲，他们是精确的表述，可问题是如果摆针偏差是3°呢，那么这是一种什么样的状态呢。我们可以用“很小”来表述它。如果是7°呢，可以说它是“中”偏“小”。那么如果到了80°呢，它的偏差可以说“非常大”。而我们调节的过程实际上就是让系统的偏差由非常“大”逐渐向非常“小”过度的过程。当然，我们系统这个调节过程是快速稳定的。通过上面的说明，可以认识到，其实对于每一种状态都可以划分到大、中、小三个状态当中去，只不过他们隶属的程度不太一样，比如6°隶属于小的程度可能是0.3，隶属于中的程度是0.7，隶属于大的程度是0。这里实际上是有一个问题的，就是这个隶属的程度怎么确定？这就要求我们去设计一个隶属函数。详细内容可以查阅相关的资料，这里没有办法那么详细的说明了。<http://baike.baidu.com/view/150383.htm>（见附录3）这里面有些说明。那么，知道了隶属度的问题，就可以根据目前隶属的程度来控制电机以多大的速度和方向转动了，当然，最终的控制量肯定要落实在控制电压上。这点可以很容易的想想，我们控制的目的就是让倒立摆从隶属“大”的程度为1的状态，调节到隶属“小”的程度为1的状态。当隶属大多一些的时候，我们就加快调节的速度，当隶属小多一些的时候，我们就减慢调节的速度，进行微调。可问题是，大、中、小的状态是汉字，怎么用数字表示，进而用程序代码表示呢？其实我们可以给大、中、小三个状态设定三个数字来表示，比如大表示用3表示，中用2表示，小用1表示。那么我们完全可以用1\*0.3+2\*0.7+3\*0.0=1.7来表示它，当然这个公式也不一定是这样的，这个公式的设计是系统模糊化和精确化的一个过程，读者也可参见相关文献理解。但就1.7这个数字而言，可以说明，目前6°的角度偏差处于小和中之间，但是更偏向于中。我们就可以根据这个数字来调节电机的转动速度和时间了。当然，这个数字与电机转速的对应关系，也需要根据实际情况进行设计和调节。

    前面一个例子已经基本上说明了模糊算法的基本原理了。可是实际上，一个系统的限制因素常常不是一个。上面的例子中，只有偏差角度成为了系统调节的参考因素。而实际系统中，比如PID系统，我们需要调节的是比例、积分、微分三个环节，那么这三个环节的作用就需要我们认清，也就是说，我们需要根据超调量、调节时间、震荡情况等信息来考虑对这三个环节调节的比重，输入量和输出量都不是单一的，可是其中必然有某种内在的逻辑联系。所以这种逻辑联系就成为我们设计工作的重点了。下一篇文章将详细分析PID三个变量和系统性能参数之间的联系。

## PID控制算法的c语言实现十一（PID系列完结篇） 模糊PID的参数整定

  这几天一直在考虑如何能够把这一节的内容说清楚，对于PID而言应用并没有多大难度，按照基本的算法设计思路和成熟的参数整定方法，就算是没有经过特殊训练和培训的人，也能够在较短的时间内容学会使用PID算法。可问题是，如何能够透彻的理解PID算法，从而能够根据实际的情况设计出优秀的算法呢。

  通过讲述公式和基本原理肯定是最能说明问题的，可是这样的话怕是犯了“专家”的错误了。对于门槛比较低的技术人员来讲，依然不能透彻理解。可是说的入耳了，能不能透彻说明也是一个问题，所以斟酌了几天，整理了一下思路才开始完成PID系列文章的最后一篇。

  我所说的最后一篇不代表PID的功能和发展就止步与此，仅仅是说明，透过这一些列的文章，基本上已经可以涵盖PID设计的要点，至于更深入的研究，就交给有需要的读者去做。

   上一节中大致讲述了一下模糊算法。实际上模糊算法的很多概念在上一节中并没有深入的解释。举的例子也只是为了说明模糊算法的基本含义，真正的模糊算法是不能这么设计的，当然也不会这么简单。模糊算法的核心是模糊规则，如果模糊规则制定的出色，那么模糊算法的控制效率就高。其实这是智能算法的一般特性，规则是系统判断和处理的前提。那么就说说PID的规则该怎么制定。

   我们知道，模糊算法的本质是对PID的三个参数进行智能调节。那么首先要提出的问题是如何对PID的参数进行调节？这个问题其实是参数整定的问题，现实当中有很多整定方法。可是我们需要从根本上了解为什么这么整定，才能知道该如何建立数学模型进行分析。那么要回答如何整定参数的问题，就需要先明白PID参数的作用都是什么？对系统有什么影响？

  我们从作用和副作用两个方面说明参数对系统的影响。

   1.比例环节Kp，作用是加快系统的响应速度，提高系统的调节精度，副作用是会导致超调;

   2.积分环节Ki，作用是消除稳态误差，副作用是导致积分饱和现象;

   3.微分环节Kd，作用是改善系统的动态性能，副作用是延长系统的调节时间。

  理解了上述问题，那么就可以“辩证施治，对症下药”了。比如说，如果系统响应速度慢，我们就加大Kp的取值，如果超调量过大我们就减小Kp的取值等等。可是问题这些语言的描述该如何用数学形式表达出来呢。我们所知道的，反馈系统的实质就是系统的输出量作为反馈量与系统的输入量进行作差，从而得到系统的误差e，那么这个误差e就能够反应目前系统所处的状态。误差e可以表明目前系统的输出状态到底偏离要求多少。而误差e的变化律ec，表示误差变化的速度。这样，我们可以根据这两个量的状态来分析三个参数此时应该如何取值，假如e为负方向比较大，ec也为负方向增大状态，此时比例环节要大一些，从而加快调节速度，而积分环节要小一些，甚至不加积分环节，从而防止负方向上出现饱和积分的现象。微分环节可以稍加一些，在不影响调节时间的情况下，起到改善系统动态性能的作用。

**附录1**

看到有不少人问到底如何让UK值与PWM占空比值对应，进而实现占空比输出和输出控制电压对应。

（注意，我这里讨论的前提是输出控制的是电压，不是PWM方波。PWM输出后要经过滤波整形再输出控制。）

前提条件：

输出电压控制电压范围是0-10V。

给定、反馈、输出电压采样输入电压范围是0-5V（经过运放）。

使用单片机AD为10位AD芯片。

那么10位AD芯片电压采集得到的数据范围就是0-1024。

PWM为 8位可调占空比方波，0对应输出占空比为0的方波，255对应输出占空比100%的方波，127对应输出50%的方波。

比如当前给定是2.5V，反馈电压是1V。（KP,KI,KD等系数略，关于PID算法的整数实现我在前文中有论述如何实现）。

那么经过AD采样

1、给定2.5V对应为 512

2、反馈1V对应为 205

假定经过PID计算得到的UK为400

也就意味着输出电压应当为（400\*（UPWM峰值电压））/1024

那么UK对应的PWM占空比是多少呢？

我们知道，UK=1024对应占空比为100，也就是PWM的占空比系数为255。可知，PWM系数 = UK/4;

那么400就应当对应系数 400/4=100。

也就是输出电压=400\*10/1024=3.9V

同时，由于采样精度以及PWM输出占空比精度控制的问题，将导致输出电压和期望值不是那么线性，所以，我在项目内加入了输出电压采样的控制。

采样AD输入为0-5V，所以，对于输出0-10V有一个缩小的比例。

输出10V则采样值对应为255

输出5V则采样之对应127

可知，3.9V对应AD结果为97

采样输出电压值，可以针对性的调整一下占空比输出，从而得到误差允许范围内的一个控制输出电压。

同时，经过一些加速控制的手段。可以比较迅速的达到控制的目的。

下文中的UK控制方法是针对增量式PID控制而来做的。

/\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*/

void PWMProcess(void)

{

uint16 idata temp;

uint16 idata UKTemp;

temp = 0;

UKTemp = 0;

if( Pwm.ChangeFlag\_Uint8 != 0 ) //判断是否需要改变占空比

{ //是否需要改变占空比和你的被控系统特性有关

Pwm.ChangeFlag\_Uint8 = 0;

UKTemp = PID.Uk\_Uint16 + SwIn.AddValue\_Uint16;

//计算UK控制量

//控制量和计算值以及一个开关量有关，我这里的开关量是系统需要的时候叠加在控制量上的一个变量。

if(UKTemp>999)

{

UKTemp = 999;

}

//这里只所以是999封顶而不是1024是因为我的系统PWM的峰值电压是12V导致。

while(1) //如果输出电压和期望电压相差 Delta，则继续调整占空比，直到在误差以内

{

ADChPro(UPWMADCH); //测量输出电压

if( ADPool.Value\_Uint16[UPWMADCH] == UKTemp)

{

return;

}

if( ADPool.Value\_Uint16[UPWMADCH] > UKTemp) //如果当前电压大于输出电压，减小占空比

{

if( ( ADPool.Value\_Uint16[UPWMADCH] - UKTemp ) > UDELTA )

{

temp = ADPool.Value\_Uint16[UPWMADCH] - UKTemp; //

temp = temp / 2; //下降可以加速下降，所以下降参数加倍

if( Pwm.DutyCycle\_Uint8 > temp )

{

Pwm.DutyCycle\_Uint8 = Pwm.DutyCycle\_Uint8 - temp;

}

else

{

Pwm.DutyCycle\_Uint8 = 0;

}

}

else

{

return;

}

}

else //如果当前电压小于输出电压

{

if( ( UKTemp - ADPool.Value\_Uint16[UPWMADCH] ) > UDELTA )

{

temp = UKTemp - ADPool.Value\_Uint16[UPWMADCH];

temp = temp / 4; //上升处理不要超调，所以每次只+一半

if( (255-Pwm.DutyCycle\_Uint8) > temp )

{

Pwm.DutyCycle\_Uint8 += (temp/2);

}

else

{

Pwm.DutyCycle\_Uint8 = 255;

}

}

else

{

return;

}

}

DisPlayVoltage();

PWMChangeDuty(Pwm.DutyCycle\_Uint8); //改变占空比

Delay(10,10);

}

}

}

/\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*/

**附录2**

**直流电机PWM调速系统中控制电压非线性研究**

**引言**

    由于线性放大驱动方式效率和散热问题严重，目前绝大多数直流电动机采用开关驱动方式。开关驱动方式是半导体功率器件工作在开关状态，通过脉宽调制PWM控制电动机电枢电压，实现调速。目前已有许多文献介绍直流电机调速，宋卫国等用89C51单片机实现了直流电机闭环调速；张立勋等用AVR单片机实现了直流电机PWM调速；郭崇军等用C8051实现了无刷直流电机控制；张红娟等用PIC单片机实现了直流电机PWM调速；王晨阳等用DSP实现了无刷直流电机控制。上述文献对实现调速的硬件电路和软件流程的设计有较详细的描述，但没有说明具体的调压调速方法，也没有提及占空比与电机端电压平均值之间的关系。在李维军等基于单片机用软件实现直流电机PWM调速系统中提到平均速度与占空比并不是严格的线性关系，在一般的应用中，可以将其近似地看作线性关系。但没有做深入的研究。本文通过实验验证，在不带电机情况下，PWM波占空比与控制输出端电压平均值之间呈线性关系；在带电机情况下，占空比与电机端电压平均值满足抛物线方程，能取得精确的控制。本文的电机闭环调速是运用Matlab拟合的关系式通过PID控制算法实现。

**1 系统硬件设计**

    本系统是基于TX-1C实验板上的AT89C52单片机，调速系统的硬件原理图如图1所示，主要由AT89C52单片机、555振荡电路、L298驱动电路、光电隔离、霍尔元件测速电路、MAX 232电平转换电路等组成。

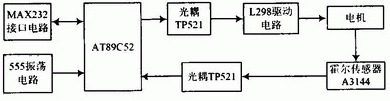
[](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

图1 闭环控制系统示意图

**2 系统软件设计**

    系统采用模块化设计，软件由1个主程序，3个中断子程序，即外部中断0、外部中断1，定时器0子程序，PID算法子程序，测速子程序及发送数据到串口显示子程序组成，主程序流程图如图2所示。外部中断0通过比较直流电平与锯齿波信号产生PWM波，外部中断1用于对传感器的脉冲计数。定时器0用于对计数脉冲定时。测得的转速通过串口发送到上位机显示，通过PID模块调整转速到设定值。本实验采用M／T法测速，它是同时测量检测时间和在此检测时间内霍尔传感器所产生的转速脉冲信号的个数来确定转速。由外部中断1对霍尔传感器脉冲计数，同时起动定时器0，当计数个数到预定值2 000后，关定时器0，可得到计2 000个脉冲的计数时间，由式计算出转速：

n=60f／K=60N／(KT) (1)

    式中：n为直流电机的转速；K为霍尔传感器转盘上磁钢数；f为脉冲频率；N为脉冲个数；T为采样周期。

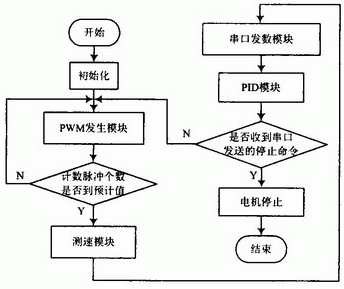
[](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

图2 主程序流程图

**3 实验结果及原因分析**

    3．1 端电压平均值与转速关系

***3．1．1 实验结果***

    实验用的是永磁稳速直流电机，型号是EG-530YD-2BH，额定转速2 000～4 000 r／min，额定电压12 V。电机在空载的情况下，测得的数据用Matlab做一次线性拟合，拟合的端电压平均值与转速关系曲线如图3(a)所示。相关系数R-square：0．952 1。拟合曲线方程为：

y=0．001 852x+0．296 3 (2)

    由式(2)可知，端电压平均值与转速可近似为线性关系，根椐此关系式，在已测得的转速的情况下可以计算出当前电压。为了比较分析，同样用Matlab做二次线性拟合，拟合的端电压平均值与转速关系曲线如图3(b)所示。相关系数R-square：0．986 7。

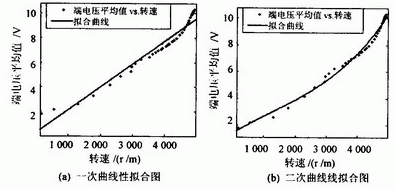
[](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

图3 端电压平均值与转速关系曲线图

***3．1．2 原因分析***

    比较图3(a)可知，当转速在0～1 500 r／min和4 000～5 000 r／min，端电压平均值与转速间存在的非线性，用二次曲拟合如图3(b)所示，拟合相关系数较高。由图3(a)可见，当电机转速为0时电机两端电压平均值约为1．3 V。这是因为电机处于静止状态时，摩擦力为静摩擦力，静摩擦力是非线性的。随着外力的增加而增加，最大值发生在运动前的瞬间。电磁转矩为负载制动转矩和空载制动转矩之和，由于本系统不带负载，因此电磁转矩为空载制动转矩。空载制动转矩与转速之间此时是非线性的。电磁转矩与电流成正比，电流又与电压成正比，因此此时电压与转速之间是非线性的。

    当转速在2 000～4 000 r／min线性关系较好，占空比的微小改变带来的转速改变较大，因此具有较好的调速性能。这是因为随着运动速度的增加，摩擦力成线性的增加，此时的摩擦力为粘性摩擦力。粘性摩擦是线性的，与速度成正比，空载制动转矩与速度成正比，也即电磁转矩与电流成正比，电流又与电压成正比，因此此时电压与转速之间是线性的。当转速大于4 000 r／min。由于超出了额定转速所以线性度较差且调速性能较差。此时用二次曲线拟合结果较好，因为当电机高速旋转时，摩擦阻力小到可以忽略，此时主要受电机风阻型负荷的影响，当运动部件在气体或液体中运动时，其受到的摩擦阻力或摩擦阻力矩被称为风机型负荷。对同一物体，风阻系数一般为固定值。阻力大小与速度的平方成正比。即空载制动转矩与速度的平方成正比，也即电磁转矩与速度的平方成正比，电磁转矩与电流成正比，电流又与电压成正比，因此此时电压与转速之间是非线性的。

**3．2 占空比与端电压平均值关系**

***3．2．1 实验结果***

    拟合占空比与端电压平均值关系曲线如图4所示。相关系数R-square：0．998 4。拟合曲线方程为：

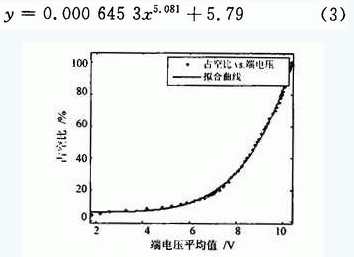
[](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

图4 占空比与端电压平均值关系曲线图

    如图4所示，占空比与端电压平均值满足抛物线方程。运用积分分离的PID算法改变电机端电压平均值，可以运用此关系式改变占空比，从而实现了PWM调速。

    用示波器分别测出电压的顶端值Utop与底端值Ubase，端电压平均值Uarg满足关系式：

[129588122903281250](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

    其中：α为占空比。

    正是由于所测得的电机端电压底端值Ubase不为0，所以得出的占空比与端电压平均值之间关系曲线为抛物线。若将电机取下，直接测L298的out1与out2输出电压。所测得的电机端电压底端值Ubase约为0，所得的占空比与端电压平均值满足线性关系，即令式(4)中Ubase为0，式(4)变为：

[129588122977343750](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

***3．2．2 原因分析***

    将电机取下后，直接测L298的输出端之间的电压，占空比与端电压平均值满足关系式(5)，说明整个硬件电路的设计以及软件编程的正确性。从电机反电势角度分析，当直流电机旋转时，电枢导体切割气隙磁场，在电枢绕组中产生感应电动势。由于感应电动势方向与电流的方向相反，感应电动势也即反电势。直流电机的等效模型如图5所示。图5(a)表示电机工作在电动机状态。图5(b)表示电机工作在发电机状态。

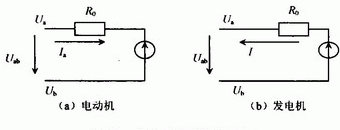
[](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

图5 直流电机等效电路

    如图5(a)所示，电压平衡方程为：

[129588123149062500](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

式中：U为外加电压；Ia为电枢电流；Ra为电枢绕组电阻；2△Ub为一对电刷接触压降，一般取2△Ub为0．5～2 V；Ea为电枢绕组内的感应电动势。电机空载时，电枢电流可忽略不计，即电流Ia为0。空载时的磁场由主磁极的励磁磁动势单独作用产生。给电机外加12 V的额定电压，由(6)可得反电势：

[129588123220625000](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

    以40％的占空比为例，电机端电压Uab是测量中的电压平均值Uarg，其值为8．34 V，测量中的电压底端值Ubase约为7 V。由式(7)可得Ea的值范围应在6．34～7．84 V。由图5(b)可见，此时Uab的值是测得的底端值Ubase即电机的电动势Ea为7 V。

    当PWM工作在低电平状态，直流电机不会立刻停止，会继续旋转，电枢绕组切割气隙磁场，电机此时工作在发电机状态，产生感应电动势E。

[129588123289062500](http://articles.e-works.net.cn/Component/Article90249.htm)

    式中：Ce为电机电动势常数；φ为每级磁通量。由于电机空载，所以图5(b)中无法形成回路。用单片机仿真软件Proteus可直观的看出在PWM为低电平状态，电机处于减速状态。低电平持续时间越长，电机减速量越大。正是由于在低电平期间，电机处于减速状态，由式(8)可知，Ce，φ均为不变量，转速n的变化引起E的改变。此时Uab的值等于E的值。电机在低电平期间不断的减速，由于PWM周期较短，本文中取20 ms，电机在低电平期间转速还未减至0，PWM又变为高电平了。这样，就使测得的Ubase值不为0。以40％的占空比为例，当PWM工作在低电平状态，测得Ubase的值约为7 V。由式(8)可知，当正占空比越大，转速也就越大，同时减速时间越短，感应电势E的值越大。所以Ubase的值也就越大。

**4 结语**

    重点分析了直流电机PWM调速过程中控制电压的非线性，对非线性的影响因素做了详细的分析。由于PWM在低电平期间电压的底端值不为0，导致了占空比与电机端电压平均值之间呈抛物线关系。因此，可用得出的抛物线关系式实现精确调速。本系统的非线性研究可为电机控制中非线性的进一步研究提供依据，在实际运用中，可用于移动机器人、飞行模拟机的精确控制。

# 附录3

隶属函数(membership function)，用于表征模糊集合的[数学工具](http://baike.baidu.com/view/750697.htm)。对于普通集合A，它可以理解为某个论域U上的一个子集。为了描述论域U中任一元素u是否属于集合A，通常可以用0或1标志。用0表示u不属于A，而用1表示属于A ，从而得到了U上的一个二值函数χA（u），它表征了U的元素u对普通集合的从属关系，通常称为A的特征函数，为了描述元素u对U上的一个模糊集合的隶属关系，由于这种关系的不分明性，它将用从区间[0，1]中所取的数值代替0，1这两值来描述，记为（u），数值（u）表示元素隶属于模糊集的程度，论域U上的函数μ即为模糊集的隶属函数，而（u）即为u对A的[隶属度](http://baike.baidu.com/view/1806495.htm)。